

Sensor Scheduling in Networked Sensor Systems

著者	荒井 翔悟
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	情博第474号
URL	http://hdl.handle.net/10097/51153

氏名 (本籍地)	荒井 翔悟		
学位の種類	博士 (情報科学)		
学位記番号	情博第 474 号		
学位授与年月日	平成22年 3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科 (博士課程) システム情報科学専攻		
学位論文題目	Sensor Scheduling in Networked Sensor Systems (ネットワークセンサシステムにおけるセンサスケジューリング)		
論文審査委員	(主査) 東北大学教授	橋本 浩一	
	東北大学教授	出口 光一郎	東北大学教授 田所 諭

論文内容の要旨

第1章は序論であり、本研究の背景について説明している。空間的に分散配置された多数のセンサをネットワーク結合したシステムは、ネットワークセンサシステムやセンサネットワークと呼ばれ、研究、開発が行われている (Fig. 1)。ネットワークセンサシステムを構成するセンサには、多くの場合、バッテリーが搭載されており、センサ間で無線通信を行うことが可能である。この2点の特徴から、ネットワークセンサシステムでは、電源ケーブル、通信ケーブルが不要であり、システムの設置が容易で、設置場所に関する制約が相対的に小さくなっている。したがって、環境監視、動物追跡、精密農業への応用や、ターゲットトラッキング、移動体制御や制御系への利用など様々な分野への活用が期待されている。ネットワークセンサシステムを利用する際には、いくつかの問題が存在する。(1): センサに搭載されたバッテリーの節約のために、センサの消費電力を抑える必要がある。特に、センサが無線通信を行う際に、多くの電力が消費されるため、センサ間通信を制限することが重要である。(2): センサ間通信容量が小さい。(3): 多数のセンサから構成されるネットワークセンサシステムは、膨大な量の観測情報の取得が可能のために、それらの情報に対処する手法が必要である。(3) に対して、つまり膨大な情報に対処するには二つの方法がある。一つ目の方法は、センサフュージョンである。センサフュージョンとは、多数のセンサの観測情報を処理して、目的の情報を得るための手法である。センサフュージョンを行う際には、センサ間で同期をとることが重要である。同期には、時刻同期と位相同期の二つがある。時刻同期は、センサ間の内部時計の同期を行うことであり、位相同期は、各々のセンサが観測する時刻を同期させることに対応する。位相同期を行うと、非同期の場合より、観測情報を処理した結果得られた対象の推定値がよくなる場合があること、また情報処理が容易に行えることから、しばしば位相同期はセンサフュージョンを行う際に前提となる。しかし、位相同期は、同期信号や専用のデバイスが必要となることがあり、コストの高い技術である。(3) に対処する二つ目の方法に、センサスケジューリングがある (Fig. 2)。センサスケジューリングは、使用するセンサを各時刻で動的に選択する手法であり、数々の利点が存在する。まず、センサスケジューリングを行うことで、リアルタイムなデータ処理を行い易くなる利点がある。特に、制御系ではリアルタイム性は

必須であるので、この点は重要である。つぎに、センサフュージョンの前処理として、センサスケジューリングを行うことで、センサフュージョンの計算時間を削減する効果がある。三番目の利点は、センサスケジューリングは上記の (1), (2) の問題の解決を図れる点にある。センサ数が増えると、可能なセンサスケジューリング候補の数が指数関数的に増大するので、計算数の削減に焦点が当てられることが多い。以上の背景を受けて、本論文では、計算時間の少ないセンサスケジューリング手法を提案すること、ならびに位相同期が必要とはならない条件、すなわち非同期のセンサシステムを用いた方が同期センサシステムを利用する場合より、対象の状態推定値がよくなる条件を導出することを目的とする。この条件が導出された場合、高コストな位相同期が不要になり、ネットワークセンサシステムのコスト低減につながると考えられる。第2章では、本論文とこれまでの研究の違いが述べられ、問題設定が定式化される。第3章では、単一種類のセンサから構成されるシステムに対するセンサスケジューリング手法が提案され、連続時間システムと離散時間システムにおけるセンサスケジューリング問題の性質の差異が明らかにされる。第4章では、複数種類のセンサに対応可能な、センサスケジューリング手法が提案された後、センサスケジューリングを行う際のシステムの安定条件の導出が行われる。第5章では、3章と4章で提案されたアルゴリズムが、モバイルセンサ、センサ間通信がある場合、状態推定問題、時変システムなど様々な状況へ拡張される。第6章では、同期センサシステムと非同期センサシステムのカルマンフィルタによる状態推定性能の比較が行われ、非同期センサシステムのほうが状態推定性能が向上するケースが存在すること、およびその条件の導出が行われる。第7章は結論である。

第2章では、本論文で議論される問題が設定されている。センサスケジューリング問題に関して、本論文と他の研究との違いの一つは、センサのモデルにある。レーダセンサやカメラなどのセンサでは、センサの観測ノイズの統計的な性質は、観測対象とセンサの相対的な距離、姿勢によって変化する。しかし、この状態依存ノイズが他の研究では考慮されておらず、これまでに提案されたセンサスケジューリングでは、妥当なセンサスケジューリングを計算することが困難であった。そこで、本論文では、状態依存ノイズを考慮したセンサモデルを構築し、さらに状態の変化をセンサスケジューリングにフィードバックするためにモデル予測型のセンサスケジューリング問題を定式化した。非同期センサシステムの性能が同期システムより向上する際の条件が定量的に導出されたことはないので、本論文では、非常に簡単なシステムを対象に条件の導出を試みた。二つのセンサから構成されるセンサシステムを対象とし、カルマンフィルタを実装した際の、両システムの状態推定誤差分散値を比較する形で問題の定式化を行った (Fig. 3)。

第3章では、単一種類のセンサから構成されるネットワークセンサシステムに対するセンサスケジューリングアルゴリズムを提案している。最適性の原理を用いて、センサモデルに関するある条件の下で、各時刻で二次形式評価関数を最小化する最適なセンサを導出する最適アルゴリズムが導出されている。この条件を満たさない場合についても、線形近似によりアルゴリズムの導出が行われた。一般的なセンサスケジューリングアルゴリズムの計算時間は、センサ数と予測区間の長さ依存して指数関数的に増大するが、本論文で提案したアルゴリズムの計算時間は、センサ数のみに比例して増加し、他のアルゴリズムと比較して計算時間が格段に短くなっている。提案したアルゴリズムは、数値シミュレーションによって検証され、その有用性が確認されている。つぎに、連続時間システムと離散時間システムに対するセンサスケジューリング問題の性質の違いについて議論した。離散時間システムについては、評価区間が有限であっても無限であっても、状態空間内にセンサ切替平面が存在し、センサスケジューリングが、各時刻のシステムの状態に依存することが示される。連続時間システム

に対しては、評価区間が無限の場合には、センサ切替平面が存在するが、有限の場合には、センサ切替平面は存在せず、最適なセンサスケジューリングが、各時刻のシステムの状態とシステムの初期状態に依存することが、数値的に示される。第3章の前半部で提案した高速センサスケジューリングアルゴリズムの高速性がセンサ切替平面の存在に立脚していたことを考えると、連続時間システムにおいては、本論文で提案したような高速アルゴリズムは存在しないと考えられる。

第4章では、複数種類のセンサに対応可能な高速センサスケジューリングアルゴリズムが提案されている。本章では、使用するセンサ種類の時系列が既知とした場合のセンサスケジューリングアルゴリズムを提案し、そのアルゴリズムを利用して、複数種類のセンサに対応可能な高速センサスケジューリングアルゴリズムを提案した。一般のアルゴリズムの計算時間は、センサ数に関して指数関数的に増加するが、提案アルゴリズムのそれはセンサの種類数に関して指数関数的に増加する。ネットワークセンサシステムが、数種類のセンサ、多数のセンサから構成される、つまり、センサの種類数は、センサ総数より極めて少ないことを考えると、提案アルゴリズムの計算時間は、極めて短いと言える。さらに、数値シミュレーションによる評価を行い、提案アルゴリズムの有用性を確認した。つぎに、センサスケジューリングを行う際の、システムの安定条件の導出を行った。センサスケジューリングは使用するセンサの切替を伴うので、switched system の一種であり、最適センサスケジューリングを行った場合でも、システムの安定性が保証されるとは限らない。リアプノフ関数を用いて、このようなシステムの安定性を解析し、安定条件を LMI 形式で導出した。

第5章では、第4章で提案したアルゴリズムを拡張し、モバイルセンサ、センサ間通信がある場合、状態推定問題、時変システムなど様々な状況へ対応なアルゴリズムを提案した。本章で提案されたアルゴリズムも、計算時間について他のアルゴリズムより優位性を保持しており、数値シミュレーションによってその有用性が確認されている。

第6章では、非同期システムの状態推定性能が、同期システムのそれより向上する条件をシステムパラメータによって特徴づけた。簡単のため、カルマンフィルタが実装された二つのセンサから構成されるセンサシステムを対象とし、観測対象のモデルをスカラシステムで与えた。非同期システムについては、サンプリングレートの揺らぎを考慮して、センサが観測を行う時刻が確率的に決定されると仮定した。システムが安定で、システム雑音の分散が観測ノイズの分散より大きければ、非同期システムのほうが状態推定誤差分散が小さくなる、つまり状態推定性能が向上するという結果が得られた。

第7章では、本論文の結論が述べられている。本論文では、ネットワークセンサシステムの実用化に向けて、センサスケジューリング問題とセンサの位相同期・非同期問題について議論した。本論文の主な成果は、状態依存ノイズを考慮した高速センサスケジューリングアルゴリズムの提案、センサスケジューリング問題の性質に関する知見、システムの安定条件の導出、高コストな位相同期が必要とされないシステム条件の導出にある。

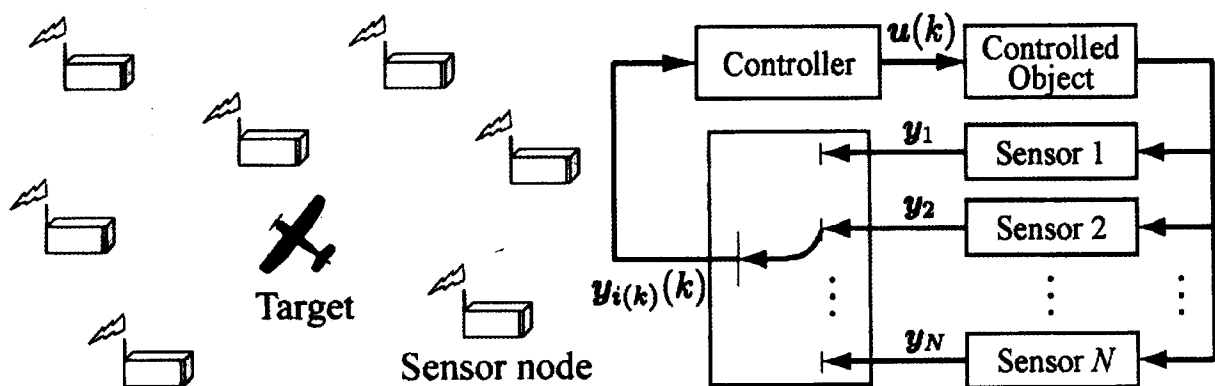


Fig. 1 Networked sensor systems

Fig. 2 A block diagram of a networked sensor system

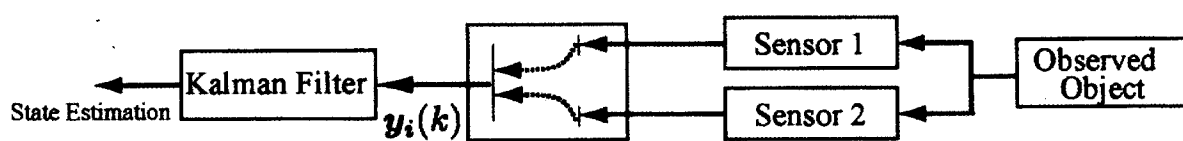


Fig. 3 A block diagram of synchronous / asynchronous sensor systems.

論文審査結果の要旨

多数のセンサをネットワーク結合したシステムはネットワークセンサシステムと呼ばれ応用場面が増加している。ネットワークセンサシステムでは多数のセンサによってもたらされる膨大な観測情報の効率的な処理が大きな課題となっている。本論文は、使用するセンサを動的に選択するセンサスケジューリングと観測情報の融合を行うセンサフュージョンに焦点を当てている。とくに、高速スケジューリングアルゴリズムの提案とセンサ間位相同期を必要としない条件の導出を柱としており、全編7章より構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、本論文で取り扱うシステムのモデリングと問題の定式化が行われている。センサスケジューリング問題を二次形式評価関数の最小化問題として定式化している。

第3章では、単一種類のセンサから構成されるシステムに対するセンサスケジューリングアルゴリズムについて論じている。カメラやレーダセンサ等においてはセンサの観測ノイズが観測対象の状態に依存する。本論文では、状態依存ノイズを考慮したセンサスケジューリングにおける最適アルゴリズムを提案している。これは、独創的かつ重要な成果である。

第4章では、複数種類のセンサから構成されるネットワークセンサシステムに対するセンサスケジューリングアルゴリズムを提案している。センサ種類に関するスケジューリングを明示的に利用したきわめて高速なスケジューリング手法を提案しており、理論的に重要な成果である。

第5章では、モバイルセンサの場合、センサ間通信がある場合、状態推定の場合、時変システムの場合など様々な状況への拡張が行われている。これは、実用性の観点から有用な成果である。

第6章では、非同期システムと同期システムの状態推定精度を比較し、非同期システムが優位になる条件をシステムパラメータで特徴づけている。これは、重要な発見であり高く評価できる。

第7章は結論である。

以上、本論文では、ネットワークセンサシステムを制御系へ組み込む際に問題となるセンサ情報縮約に関して、高速なセンサスケジューリングアルゴリズムの提案、センサ同期が必要ない条件の導出、有用性の検証を行っている。この成果は、システム情報科学ならびに計測制御工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。